第40卷　第11期
2023年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40　No. 11
Nov. 2023

祁连山地区土地利用变化对碳储量的影响及经济价值估算

雷　馨，　海新权

（甘肃农业大学财经学院，甘肃 兰州　730070）

摘　要： 人类活动是土地利用变化的主要驱动因素，土地利用/覆盖变化通过影响陆地生态系统的结构和功能间接影响生态服务价值。本文基于土地利用转移矩阵和动态度分析了2000—2020年祁连山地区土地利用变化特征，应用InVEST模型估算了祁连山地区生态系统的碳储量，结合复利现值公式估算了各时期碳储量经济价值。结果表明：(1) 2000—2020年草地和未利用地是祁连山地区的主要土地利用类型，占土地利用类型总面积80%以上，且两者之间转换最为显著。因人类活动加剧和城市化进程的推进，祁连山地区林地和未利用地面积减少，其他地类面积增加；(2) 由于该地适宜的地理环境、植被保护力度的加强与人工管理的作用，2000—2020年祁连山地区碳储量增加 44.26×10^4 t，并呈"西北低，东南高"的空间分布特征，与土地利用类型分布显著相关。其中，耕地、草地和水域碳储量增加 73.1×10^4 t，林地和未利用地碳储量减少 28.8×10^4 t；(3) 2000—2020年祁连山地区碳储量经济价值由 2325.9×10^6 元增加至 3908.8×10^6 元，增量为 1582.9×10^6 元，增长率为68.1%。其中，草地碳储量经济价值20 a间增加了 851.8×10^6 元，增长率为71.5%，成为该地区碳储量经济价值增加的主要驱动力。祁连山地区碳储量呈增加趋势，未来相关部门在延续先前管理方案的同时，也要警惕当前气候变化对碳储量的影响。研究结果可为区域制定优化土地利用目标、推动可持续发展和应对全球气候变化提供科学依据。

关键词： 土地利用；InVEST模型；碳储量；碳储量经济价值；祁连山

全球气候变暖引发的一系列环境问题已对生态环境和社会经济的可持续发展产生深远影响[1]。人类活动造成的土地利用变化/覆盖导致陆地生态系统碳源/汇失衡成为大气温室气体浓度增加的主要原因之一。土地利用变化通过改变陆地生态系统结构和功能，影响陆地生态系统的碳储量[2]，间接影响碳储量经济价值。因此，研究区域土地利用变化对碳储存与碳储量经济价值的影响，可为我国制定减排增汇政策提供重要的科学基础，对实现"双碳"目标具有重要意义。

当前已有大量学者对土地利用变化和碳储量的估算进行了研究，传统的碳储量估算方法主要有样地清查法、野外获取法和IPCC清单法等[3-4]，这些方法获取数据路径可靠，估算结果精确，但因普适性差、采样周期长和工作繁琐等不足，无法进行大尺度研究[4]。随着技术的发展，多数学者基于Century模型、RothC模型和LPJ-GUESS模型等[5-6]进行区域碳储量估算。虽然模型估算方法弥补了传统方法的不足，但多数集中于单一土地利用类型的研究，忽略了各土地利用类型之间存在相互竞争的复杂关系[7]。然而，InVEST模型不仅可以弥补传统估算方法的不足，而且具有参数少、模型精度高和运行速度快等优点[8-9]，已被国内外大量学者应用于不同尺度综合土地利用变化与碳储量之间复杂的响应机制研究[10-12]。如李俊等[11]基于InVEST模型对昆明市的碳储量进行评估，研究表明20 a间因建筑用地的扩张导致碳储量下降了 9×10^6 t，为昆明市优化土地利用和可持续发展目标提供数据支撑；Li等[12]基于InVEST模型对长春市土地利用与碳储量的变化进行研究，结果表明，近10 a间，耕地向建设用地转移

收稿日期： 2023-06-09；　**修订日期：** 2023-09-08
基金项目： 甘肃农业大学青年导师基金项目(GAU-QDFC-2022-20)
作者简介： 雷馨(1995-)，女，硕士研究生，主要从事土地利用与碳储量价值估算研究. E-mail: 3413661866@qq.com
通讯作者： 海新权. E-mail:haixq@gsau.edu.cn

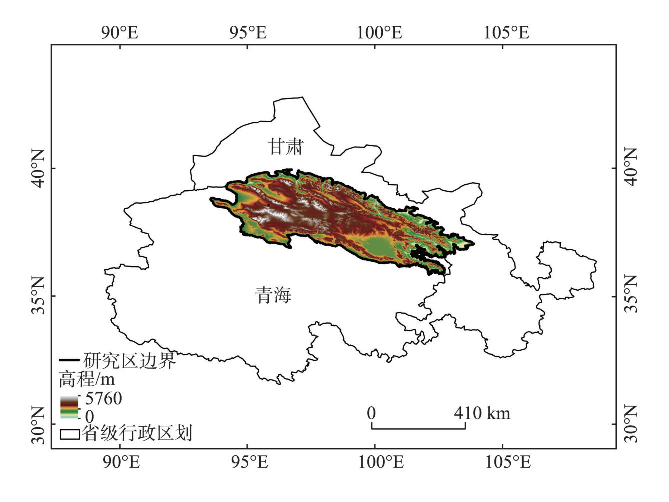
是该地区碳储量损失的主要原因。通过测算不同土地利用方式下的碳储量变化,并将其转化为碳排放减少或碳吸收增加对应的经济价值,可以对土地利用变化的效益进行量化评估,这种估算的结果通常作为政策制定和资源配置的决策参考。例如,伍格致等[13]利用造林成本法和碳税法的算数平均值对湖南省森林的碳储量经济价值进行估算,为湖南省生态保护机制提供数据基础。值得注意的是,国内碳交易市场不成熟,尚未形成统一的碳储量经济价值估算方法,主要有市场价值法、造林成本法、人工固定CO_2成本法、碳税法、支付意愿法和实物期权法等[14],这些方法理论通俗易懂、所需数据可通过调查、统计年鉴和相关资料获得,但通常忽略了货币的时间价值,往往通过某一时期或固定的碳交易价格去估算不同时期的碳储量经济价值,从而导致估算结果精确度较差[15]。碳税法采用瑞典碳税率,但瑞典碳税率对于我国偏高,不符合我国现发展阶段,会使估算的结果偏高[16]。因此,在估算不同时期的碳储量经济价值时,碳价格的时间价值非常重要。目前针对这个问题,国外已有相关研究[17-18]。例如,Hussainzad等[17]利用净现值法,评估彭亨州固碳的经济价值,为可持续环境保护和低碳经济转型提供有力的支持。然而,国内关于该问题的研究相对欠缺。因此,本研究采用财务管理、金融学和工程经济学领域广泛使用的复利现值法,通过中央银行规定的贴现率,考虑了碳价格变化的时间价值[18],对祁连山地区不同时期碳储量的经济价值进行估算。

祁连山地区是中国西北地区重要的生态安全屏障,在维系区域生态平衡中扮演着不可或缺的角色[19]。但随着近年来人口的快速增长、经济的迅速发展以及城镇化进程的急速推进,该地区土地利用变化明显,一定程度上改变了研究区的碳储存功能。现有的研究主要关注不同影响因子与生态环境系统之间的响应机制[19-20],通过量化生态系统服务价值,可以更好的建立生态补偿标准,并有效权衡生态服务供需平衡效应[21],而对生态系统碳储量经济价值的估算仍未知。基于此,本研究使用2000—2020年祁连山地区的五期土地利用数据,通过土地利用转移矩阵和动态度分析了土地利用变化特征,应用InVEST模型评估了该地区2000—2020年陆地生态系统碳储量,并结合中央人民银行的贴现率,使用复利现值公式估算了碳储量经济价值。本研究揭示了土地利用变化如何影响碳储量并估算了碳储量经济价值,对于制定土地利用策略、优化生态环境、应对气候变化及推动碳交易市场发展具有重要现实意义。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

祁连山地区(93.4°~103.4°E,35.8°~40.0°N)位于中国西北部,地处甘肃、青海省交界(图1),总面积约为19.1×10^4 hm^2,东起乌鞘岭,西止当金山口,北临河西走廊,南依柴达木盆地。该地具有典型大陆性气候特征,是我国生物多样性保护热点区域和重要的生态环境区域[22]。祁连山地区土壤类型多样,具有明显的垂直分布特征,且矿产和人文资源丰富[23]。因此,祁连山的生态保护不仅关乎地区生态的稳定,更涉及我国整个西部地区的生态平衡与经济社会的可持续发展。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2020)4619号,对底图无修改。

图1 祁连山地区示意图

Fig. 1 Map of Qilian Mountains

1.2 数据来源

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/);全国年平均气候数据源于《2020中国气候公报》;研究区的年平均气温数据来自《中国地面资料气候标准值数据集》(http://data.cma.cn)。碳密度数据如表1所示,主要基于两个来源:第一,依据参考文献求得实测数据的平均值[24],第二,针对难以获得的数据,利用校正

表1　祁连山地区不同土地利用类型碳密度

Tab. 1　Carbon density of different land types in Qilian Mountains

土地利用类型	碳密度/($t\cdot hm^{-2}$)				
	地上生物量	地下生物量	土壤	死亡有机质	总碳密度
耕地	4.56	7.45	106.30	3.67	121.98
林地	51.08	37.51	174.95	6.71	270.25
草地	1.02	6.15	128.51	3.30	138.98
水域	0.00	0.00	170.27	0.00	170.27
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地	0.12	1.57	52.96	0.00	54.65

模型[25]并参照修正公式[26]对全国尺度的碳密度数据进行修正而获得。由于建筑用地土地硬化，本研究将建筑用地的碳密度视为0。

1.3　研究方法

1.3.1　土地利用转移矩阵　土地利用转移矩阵是在一定时间和区域内土地利用类型相互转换的二维矩阵，表示土地利用结构和土地利用类型的变化方向[27]。

$$S_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中：S_{ij}为某时期第i类土地利用类型转化为第j类土地的面积(hm^2)；n为土地利用类型数量。

1.3.2　土地利用动态度　土地利用动态度是反应区域一定时间内土地利用变化速率的指标，包括单一土地利用动态度(K)和综合土地利用动态度(LC)[19]。

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times 100\% \quad (2)$$

式中：K为某类土地利用类型动态度；U_a和U_b分别为研究初期和末期某土地利用类型的面积(hm^2)；T为研究时长(年)。

$$LC=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta LU_{i-j}}{2\sum_{i=1}^{n}LU_i}\right]\times\frac{1}{T}\times 100\% \quad (3)$$

式中：LC为土地利用综合动态度；LU_i为研究起始时间第i类土地利用类型的面积(hm^2)；ΔLU_{i-j}为研究期内第i类土地转化为第j类土地利用类型面积的绝对值；T为研究时长(年)。

1.3.3　InVEST模型　本研究采用InVEST模型中的Carbon storage and sequestration模块进行碳储量计算，陆地碳库主要包括：地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机质四大碳库[11]。碳储量由各土地利用类型碳密度与其相应的土地利用类型面积相乘所得。计算方法如下所示：

$$C_k=C_{above}+C_{below}+C_{soil}+C_{dead} \quad (4)$$

$$C_{total}=\sum_{k=1}^{n}A_k\times C_k,\qquad (k=1,2,\cdots,6) \quad (5)$$

式中：C_k为某土地利用类型碳储量之和(t)；C_{above}为地上生物量碳密度($t\cdot hm^{-2}$)；C_{below}为地下生物量碳密度($t\cdot hm^{-2}$)；C_{soil}为土壤碳密度($t\cdot hm^{-2}$)；C_{dead}为死亡有机质碳密度($t\cdot hm^{-2}$)；A_k为某土地利用类型面积(hm^2)；C_k为某土地利用类型碳密度($t\cdot hm^{-2}$)；C_{total}为区域陆地生态系统总碳储量(t)。

1.3.4　复利现值法　复利现值法产生于商品经济学中，涵盖了货币的时间价值，是个人和企业进行投资决策时的重要指标。尽管该方法在经济学中被广泛应用，但在陆地碳储量经济价值估算方面还未被探索。本研究通过碳交易平台获得2019—2021年平均碳交易价格作为2020年的碳价格，通过复利现值公式和转换系数得到2000年、2005年、2010年和2015年的碳交易价格，如表2所示。

复利现值表示未来一定时间的特定资金按复利计算的现值。

$$P_n=F\times(P/F,e,n) \quad (6)$$

式中：P_n为第n期的碳价格(元)；F为碳价格终值(元)；$(P/F,e,n)$为复利现值系数；e为贴现率；n为期数。

1.3.5　碳储量价值估算　碳储量价值表示生态系统吸收并储存碳所需要的经济价值。

$$P_c=\sum_{n=1}^{n}C_n\times P_n,\qquad (n=1,2,\ldots,n) \quad (7)$$

式中：P_c为陆地生态系统总碳储量价值(元)；C_n为第n期碳储量(t)；P_n为第n期碳交易价格(元·t^{-1})。

表2　2000—2020年碳交易价格

Tab. 2　Carbon price from 2000 to 2020

年份	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
碳交易价格/(元·t^{-1})	105	116	128	156	173

2 结果与分析

2.1 土地利用时空变化分析

通过祁连山地区土地利用面积得到祁连山地区2000—2020年土地利用转移矩阵和动态度变化(图2,表3),祁连山地区主要以草地和未利用地为主,面积占比约83%,各土地利用类型间转换频繁。草地面积增加最显著,在过去20 a增加了3347.5 hm^2,增长率为4.1%,其中,第一个10 a草地面积增加了3605.2 hm^2,增幅为4.1%,而第二个10 a呈现减少趋势,减少了257.7 hm^2。水域、耕地和建筑用地,在过去20 a分别增加1386.4 hm^2、241.2 hm^2和136.1 hm^2,增幅分别为17.8%、4.3%和32.4%。然而,林地和未利用地面积在2000—2020呈现减少趋势,其中,未利用地面积减少明显,减少了5070.5 hm^2,第一个10 a减少了4734.7 hm^2,降幅为6%,第二个10 a减少了335.8 hm^2,降幅为0.5%。林地在过去20 a共减少40.7 hm^2,降幅最低,为0.2%。根据2000—2020年单一土地利用动态度(图3),建筑用地动态度绝对值最大,为3.24%,其次为水域、未利用地和耕地。然而,林地动态度绝对值最小,仅为0.02%。从综合土地动态度来看,祁连山地区2000—2020年土地动态度呈波动式变化,由2000年的0%增加到2010年的0.25%,随后下降到2015年的0.01%,最后在2020年回升至0.03%,整体呈增加趋势。

祁连山地区土地利用类型空间分布呈现不同的格局(图3),耕地面积占比约2.98%,主要分布在东北部和东南部,变化区域主要分布在东南部;草地面积占比40%,主要分布在北部、南部和东南部,变化区域主要分布在北部和东南部中心地带;林地在过去20 a有0.2%的小幅度减少,主要分布在东南部,变化区域零散分布在研究区;水域主要分布在

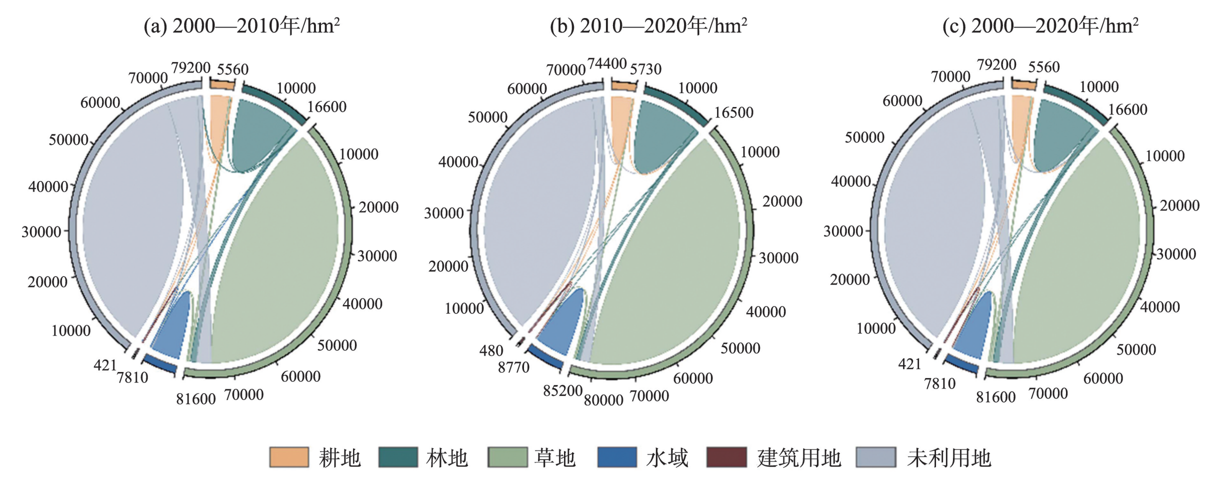


图2 祁连山地区土地利用转移矩阵

Fig. 2 Land use transfer matrix in Qilian Mountains

表3 祁连山地区土地利用类型变化

Tab. 3 Land use type change in Qilian Mountains

土地利用类型	2000—2005年		2005—2010年		2010—2015年		2015—2020年		2000—2020年	
	变化幅度/hm^2	动态度/%	变化幅度/hm^2	动态度/%	变化幅度/hm^2	动态度/%	变化幅度/hm^2	动态度/%	变化幅度/hm^2	动态度/%
耕地	60.1	0.11	107.6	0.19	−11.2	−0.02	84.8	0.15	241.2	0.43
林地	−6.3	0.00	−50.8	−0.03	36.6	0.02	−20.2	−0.01	−40.7	−0.02
草地	−69.8	−0.01	367.5	0.45	27.5	0	−28.5	−0.03	334.7	0.41
水域	6.0	0.01	953.9	1.22	−59.0	−0.07	485.5	0.56	138.6	1.78
建筑用地	2.8	0.07	56.2	1.33	66.5	1.39	10.6	0.19	136.1	3.24
未利用地	7.1	0.00	−47.4	−0.6	−60.5	−0.01	−27.5	−0.04	−5070.5	−0.64
综合动态度/%	0.00		0.25		0.01		0.03		0.27	

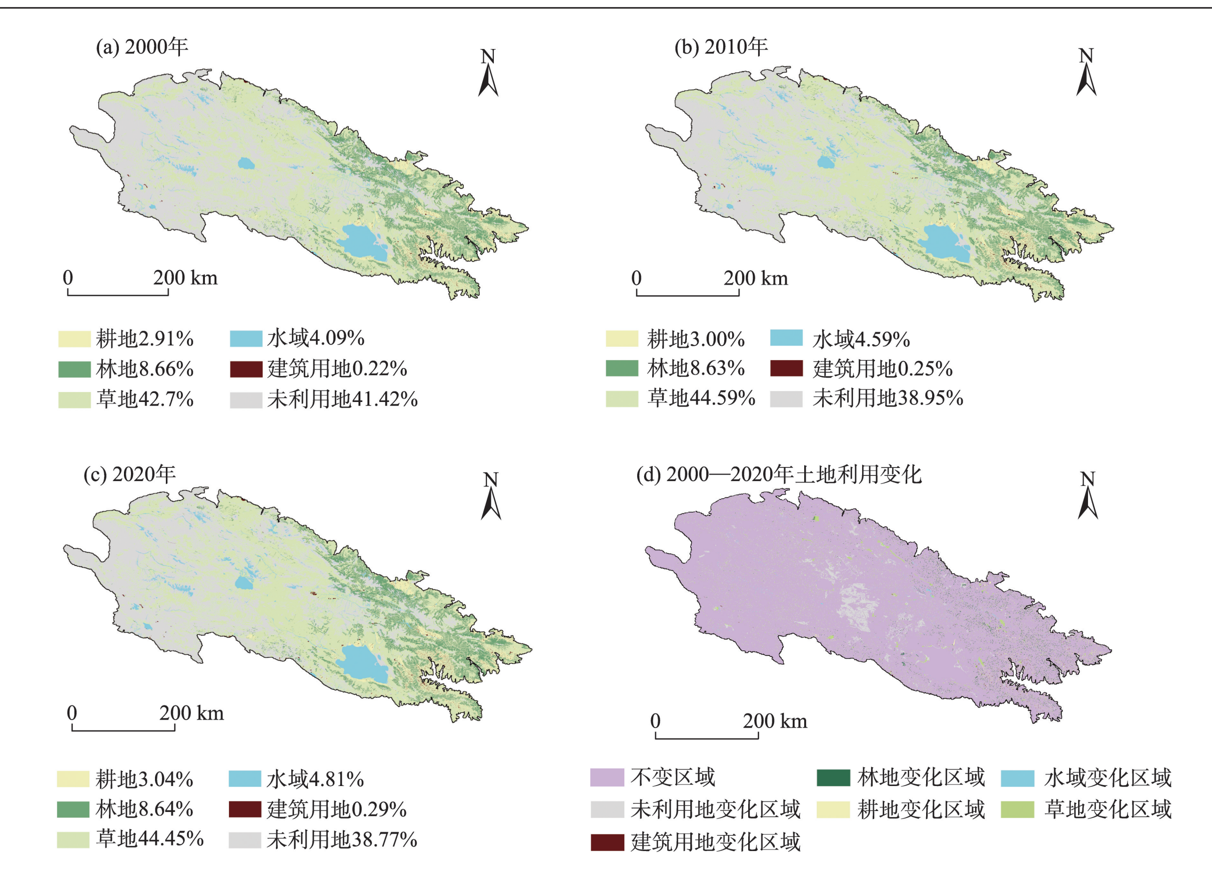


图3　祁连山地区土地利用空间分布

Fig. 3　Spatial distribution map of land use in Qilian Mountains

南部和西北部中心,变化区域零散分布于西北部,小部分集中分布于东北部的中段;截至2020年,建筑用地面积增加,增加区域主要分布于研究区北部和中段,零散分布于西部和东南部。

2.2　碳储量时空变化分析

由祁连山地区各土地利用类型碳储量的时间变化趋势可知(图4),祁连山地区总碳储量呈波动上升趋势,从2000年的22.2×10^6 t增加到2020年的22.6×10^6 t,增幅为2%。值得注意的是,在2000—2005年和2010—2015年总碳储量有小幅度的下降。20 a间耕地、草地和水域碳储量增加,林地和未利用地碳储量减少。2000—2020年耕地碳储量呈增加—减少—增加的变化趋势,20 a间增加了29.4×10^3 t,增幅为4.3%,其中,2010—2015年碳储量下降了1.4×10^3 t,降幅为0.2%。林地碳储量呈减少—增加—减少的变化趋势,20 a间碳储量下降了11×10^3 t,降幅为0.3%,其中,2010—2015年碳储量增加9.9×10^3 t,增幅为0.2%。草地碳储量呈减少—增加—减少的变化趋势,20 a间增加了465.2×10^3 t,增幅为4.1%,其中,2000—2005年和2015—2020年碳储量分别下降97.0×10^2 t和39.6×10^3 t,降幅分别为0.1%和0.3%。水域碳储量呈增加—减少—增加的变化趋势,过去20 a增加了236.1×10^3 t,增幅为17.8%,其中,2010—2015年碳储量下降,降幅为0.7%。未利用地碳储量20 a间下降了227.1×10^3 t,降幅为6.4%。

从祁连山地区2000—2020年各土地利用类型碳储量空间分布情况可知(图5)。不同时期祁连山地区碳储量空间分布大致相同,总体呈现出"西北低东南高"的空间分布格局。碳储量高值区主要分布在东部和中部,以林地和草地为主。碳储量中值区零散分布在西部,以草地和水域为主。碳储量低值区主要分布在西部和中部,以未利用地为主。2000—2020年祁连山地区总碳储量增加区域主要分布在中部区域,碳储量减少区域零星分布在祁连山整个地区。

2.3　碳储量经济价值变化

祁连山地区碳储量经济价值从2000年2325.9×10^6元增长至2020年的3908.8×10^6元,增长率为68.1%(表4)。耕地在过去20 a碳储量经济价值增

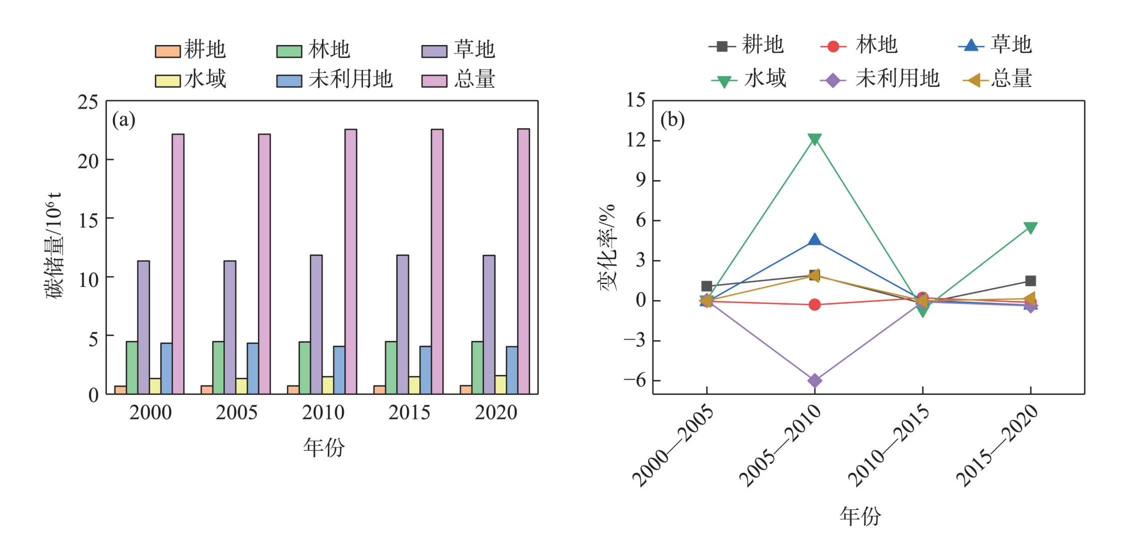


图4 祁连山地区2000—2020年各土地利用类型碳储量变化

Fig. 4 Change of carbon storages by land use type from 2000 to 2020 in Qilian Mountains

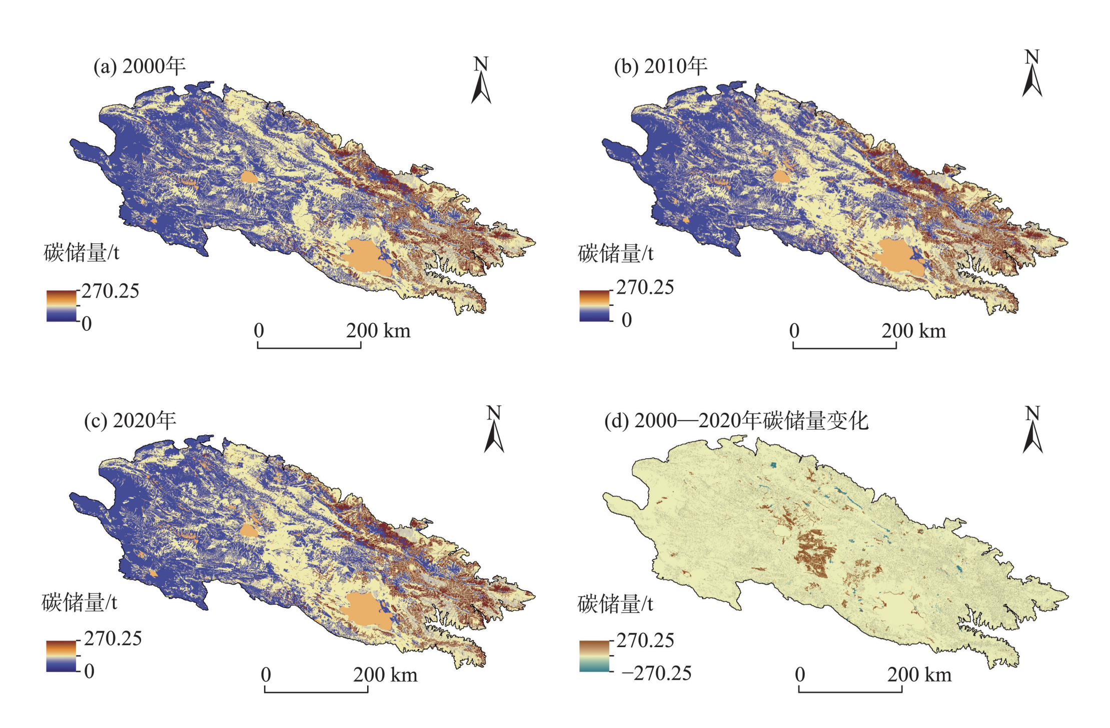


图5 祁连山地区碳储量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of carbon storages in Qilian Mountains

表4 祁连山地区2000—2020年各土地利用类型碳储量经济价值

Tab. 4 Value of carbon storages in various regions from 2000 to 2020 in Qilian Mountains /10^6元

土地利用类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
耕地	71.3	79.6	98.5	108.8	122.5
林地	469.7	518.8	570.7	697.0	772.0
草地	1191.0	1314.7	1516.0	1848.3	2042.8
水域	139.6	154.4	191.1	231.4	270.9
未利用地	454.3	502.0	520.7	634.1	700.6
总价值	2325.9	25693.0	2888.0	3519.6	3908.8

加 51.2×10^{6} 元，增幅为71.8%，其中，2010—2015年增幅最大，为21.7%。林地和草地碳储量经济价值分别增加 302.3×10^{6} 元和 851.8×10^{6} 元，增幅分别为64%和71.2%，同样在2010—2015年增幅最高，分别为22.2%和21.9%。水域碳储量经济价值在20 a间增加 131.3×10^{6} 元，增幅为94%，但在2000—2005年增幅呈最高，为23.8%。未利用地碳储量经济价值增加 246.3×10^{6} 元，增幅为53.9%。根据各土地利用类型碳储量经济价值占比（图6），草地、林地和未利用地碳经济价值占比最高，平均占比分别为51.9%、19.9%和18.6%。相反，耕地碳储量经济价值占比最小，年平均占比为3.1%。

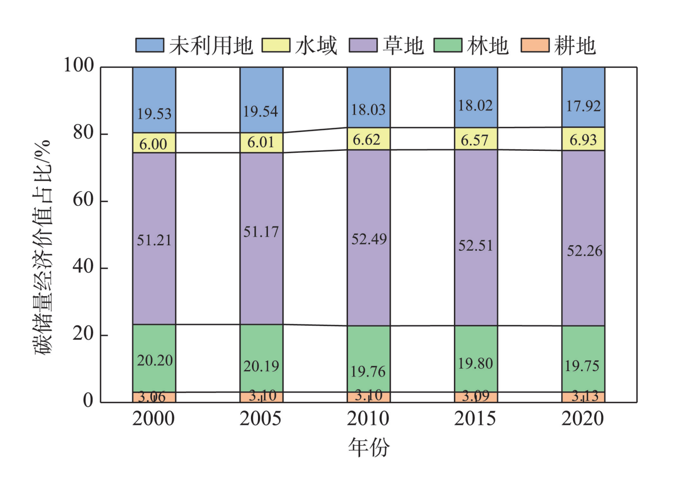


图6　祁连山地区2000—2020年各土地利用类型碳储量经济价值占比

Fig. 6　Percentage distribution of carbon economic from 2000 to 2020 in Qilian Mountains

3　讨　论

3.1　碳储量对土地利用变化的响应

长期以来，土地利用变化是影响陆地生态系统中碳储存变化的关键因素，无论是林地到耕地的转变，还是建筑用地到农业用地的转型，亦或是未利用地的开发和建设，这些变化对陆地生态系统碳存储和时空变化产生深远的影响[12]。本研究明确了祁连山地区2000—2020年土地利用变化特征，结合InVEST模型的Carbon storage and sequestration模块分析了祁连山地区各土地利用类型碳储量时空分布特征。随着人口的增加和城镇化的推进，祁连山地区的土地利用模式发生较大的转变。了解土地利用变化对碳储量的影响，有助于制定合理的土地管理政策，为减缓气候变化提供数据支撑[22]。

众所周知，耕地和林地土壤有机碳密度高，具有较强的碳储存能力，而建筑用地土壤碳密度低，相应的碳储存能力较弱。土地利用变化通过改变生态系统分布格局和土壤呼吸速率等影响陆地生态系统的碳储量。例如，李瑾璞等[28]基于InVEST模型估算湖北省陆地生态系统碳储量，研究表明，1990—2015年主要因林地等碳密度值高的地类转化为建筑用地导致碳储量减少了29.23 Tg，说明建筑用地的扩张规模直接影响碳储量变化速率；朱文博等[29]基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估，研究表明，2005—2015年建设用地的肆意扩张和林地的退化是导致碳密度下降的主要原因，对区域土地利用的合理规划具有重要意义。本研究中草地作为祁连山地区主要的土地利用类型并成为主要的碳库，对陆地生态系统起到重要作用。与邓喆等[30]对祁连山地区碳储量变化的研究得出一致的结论，即祁连山地区碳储量整体呈增加趋势，这主要归因于两方面，第一，碳密度值低的未利用地转化为碳密度值高的草地、水域和耕地等地类，增加了陆地生态系统碳储存能力[28]。第二，国家颁布的野生动物保护法和实施天保工程所采取的封山育林、禁止放牧等措施，减少人类活动，使固碳能力较强的土地在一定程度上得到了保护。然而，在2010—2015年祁连山地区碳储量出现小幅度下降，这是因为城镇化速度加快，建筑用地扩张占据了大量的水域和未利用地，导致该期间碳储量下降。由此可见，其他地类转化为建筑用地对陆地碳储存能力的降低程度影响较大。

另外，中国西北祁连山地区作为气候变化敏感区域，其生态环境脆弱，受到气候变化和人类活动的双重影响。尽管本研究表明当地生态系统碳储量在2000—2020年整体呈上升趋势，但是由于特殊的地理特征和气候条件，该地区往往面临土地退化和生物多样性丧失等问题[21]。为此，建立长期的土地利用变化监测体系十分必要。随着未来气候变化的加剧和经济社会发展的需求，土地利用变化程度会进一步加剧。为了实现土地利用的可持续发展，未来土地管理决策必须对社会、经济和气候因素综合考量，对祁连山地区不同发展情景下陆地碳储量进行预测，这对祁连山地区碳储量增加和环境的保护具有重要现实意义。

3.2　碳储量经济价值分析及意义

近年来，全球气候变化愈加严峻和碳交易市场

的逐步发展，对陆地生态系统的碳储量不单方面注重生态价值，对经济价值估算的重要性日益凸显。中国拥有巨大的碳排放资源，然而碳交易市场起步较晚，发展缓慢，未形成成熟的交易体系。当前，对于碳价格还尚未形成统一的标准，不同的方法估算得到的碳储量经济价值差异性较大。例如，胡峻嶍等[16]采用支付意愿法估算了四川省2014年森林植被的碳储量经济价值为865.75×10^8元，若采用造林成本法估算碳储量经济价值为1517.55×10^8元；张鑫等[31]采用造林成本法估算了昆明山西森林公园碳汇经济价值为423.6×10^6元，若采用瑞典碳税率估算碳汇的总价值为1591.10×10^6元。与以往的研究不同，本研究首次用复利现值法，估算了祁连山地区的碳储量经济价值。

在2000—2020年，祁连山地区碳储量经济价值与碳储量均呈增加趋势，结论与余娜等[32]研究结果一致，这侧面印证了当地生态系统的生态功能和环境服务能力的提升。碳储量经济价值是由碳储量和固碳价格共同决定，同一时期碳价格相同，所以碳储量是碳经济价值的关键因素[15]。但需要注意的是，碳储量在2005年和2015年出现小幅度的下降，而碳储量经济价值仍然呈现增长趋势，这主要归因于两个方面：第一，虽然碳储量下降，但由于碳价格的上涨，单位碳的价值提高，使得碳储量经济价值仍然上涨。第二，碳价格的上涨幅度远远高于碳储量的下降率。这表明，在一定条件下，碳储量减少不一定导致碳储量经济价值的下降，可能是因为碳价格和贴现率等因素的综合影响使碳储量经济价值上升。

碳储量经济价值在环境和经济领域扮演着重要的角色，其为评估碳资源的潜力、推动碳减排行动、促进碳市场的发展以及制定政策提供了基础和参考[15]。未来应当制定并实施碳定价机制、加大对低碳技术的研发和推广、建立各利益相关方之间的伙伴关系和合作，完善全球碳市场交易。同时政府可以通过采取措施保护和恢复森林、湿地和海洋等碳密集型生态系统，加强土地管理和保护，以确保土壤中的有机碳得到妥善保护和管理。

4 结 论

选取2000—2020年祁连山地区5期土地利用数据，利用土地利用转移矩阵和土地利用动态度方法分析了土地利用变化特征，应用InVEST模型估算祁连山地区2000—2020年陆地生态系统碳储量，结合复利现值公式估算碳储量经济价值变化趋势。得出如下结论：

（1）2000—2020年草地和未利用地面积占比为80%，是祁连山地区的主要土地利用类型，且两者转化较为显著。因城镇化的推进和研究区特殊的地理特征，使祁连山地区在研究期间土地利用类型呈耕地、草地、水域和建筑用地面积扩张，而林地和未利用地面积缩减的变化特征。

（2）2000—2020年祁连山地区碳储量增加44.3×10^4 t，增长率为2%，呈“西北低-东南高”的空间分布特征，延东南走向逐渐增大。这归因于研究区适宜的气候特征和产业结构，使草地面积大量增加成为碳储量增加的主要原因。其中，耕地、草地和水域共增加73.1×10^4 t，林地和未利用地共减少28.8×10^4 t。

（3）2000—2020年祁连山地区碳储量经济价值增加1582.9×10^6元，增长率为68.1%。各土地利用类型碳储量经济价值占比分别为：耕地3.1%、林地19.9%、草地51.9%、水域6.4%和未利用地18.6%。其中，草地的碳储量经济价值最大，耕地的碳储量经济价值最小，草地碳储量经济价值增加是祁连山地区碳经济价值增加的主要驱动力。

参考文献（References）：

[1] Xing L, Hu M, Wang Y. Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological risk assessment: A case study of Hubei Province, Central China[J]. Science of The Total Environment, 2020, 740: 140126.

[2] 王雅, 蒙吉军. 黑河中游土地利用变化对生态系统服务的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 200-207. [Wang Ya, Meng Jijun. Effects of land use change on ecosystem services in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 200-207.]

[3] Yan W, Wang W, Peng Y, et al. Evaluation of biomass and carbon stocks in three pine forest types in Karst Area of Southwestern China[J]. Journal of Sustainable Forestry, 2022, 41(1): 18-32.

[4] Liang Y, Hashimoto S, Liu L. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050[J]. Ecological Indicators, 2021, 120: 106939.

[5] 曹瑞红, 张美玲, 李晓娟, 等. 甘南高寒草甸土壤有机碳储量时空分布特征的模拟分析[J]. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2145-2153. [Cao Ruihong, Zhange Meiling, Li Xiaojuan, et al. Simulation analysis of the spatial and temporal and temporal distribution of soil in Gannan alpine meadow[J]. Journal of Ecology, 2022, 41(11): 2145-2153.]

[6] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 用RothC-26.3模型模拟玉米连作下长期施肥对黑土有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 44

(11): 1318-1324. [Yang Xueming, Zhang Xiaoping, Fang Huajun, et al. RothC-26.3 model simulating long-term effects of fertilization on changes of soil organic carbon in continuous cultivation of corn in Northeast China[J]. Agricultural Science in China, 2003, 44(11): 1318-1324.]

[7] 吴桂平, 曾永年, 冯学智, 等. CLUE-S模型的改进与土地利用变化动态模拟——以张家界市永定区为例[J]. 地理研究, 2010, 29(3): 460-470. [Wu Guiping, Zeng Yongnian, Feng Xuezhi, et al. Dynamic simulation of land use change based on the improved CLUE-Smodel: A case study of Yongding County, Zhangjiajie[J]. Geographical Research, 2010, 29(3): 460-470.]

[8] 王天福, 龚直文, 邓元杰. 基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1214-1232. [Wang Tianfu, Gong Zhiwen, DengYuanjie, et al. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shanxi Province based on land use change[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1214-1232.]

[9] Wang Z, Zeng J, Chen W. Impact of urban expansion on carbon storage under multi-scenario simulations in Wuhan, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(30): 45507-45526.

[10] 卢雅焱, 徐晓亮, 李基才, 等. 基于InVEST模型的新疆天山碳储量时空演变研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1896-1906. [Lu Yayan, Xu Xiaoliang, Li Jicai, et al. Research on the spatio-temporal variation of carbon storage in the Xinjiang Tianshan Mountains based on the InVEST model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1896-1906.]

[11] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于PLUS与InVEST模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 378-387. [Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming City based on PLUS and InVEST models[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2023, 43(1): 378-387.]

[12] Li Y, Liu Z, Li S, et al. Multi-scenario simulation analysis of land use and carbon storage changes in changchun city based on FLUS and InVEST model[J]. Land, 2022, 11(5): 647.

[13] 伍格致, 周妮笛. 湖南省森林碳储量及其经济价值测算研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(8): 127-132. [Wu Gezhi, Zhou Nidi. Forest carbon reserves and its economic value estimation in Hunan Province[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2015, 35(8): 127-132.]

[14] 方恺, 李程琳, 黄玮, 等. 碳汇生态产品的科学内涵、价值评估与实现路径[J]. 中国环境管理, 2023, 15(3): 17-23, 61. [Fang Kai, Li Chenglin, Huang Wei, et al. Scientific concept, value evaluation and realization paths of carbon sink ecological products[J]. Environmental Management in China, 2023, 15(3): 17-23, 61.]

[15] 刘淑琴, 王荣女, 夏朝宗, 等. 土地利用变化对盐池县碳储量及其价值影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 486-492. [Liu Shuqin, Wang Rongnv, Xia Chaozong, et al. Effects of land use change on carbon reserve and carbon sink value in Yanchi County[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 486-492.]

[16] 胡峻嵋, 黄访, 铁烈华, 等. 四川省森林植被固碳经济价值动态[J]. 生态学报, 2019, 39(1): 158-163. [Hu Junyi, Huang Fang, Tie Liehua, et al. Economic value dynamics of carbon sequestration in forest vegetation of Sichuan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(1): 158-163.]

[17] Hussainzad E A, Yusof M J M. Assessing the economic value of carbon sequestration in Taman Negara Pahang[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 540(1): 012058.

[18] Pache, R-G, Abrudan, IV, Niţă, M-D. Economic valuation of carbon storage and sequestration in Retezat National Park Romania [J]. Forests, 2021, 12(1): 43.

[19] 付建新, 曹广超, 郭文炯. 1980—2018年祁连山南坡土地利用变化及其驱动力[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2699-2709. [Fu Jianxin, Cao Guangchao, Guo Wenjiong. Land use change and its driving force on the southern slope of Qilian Mountains from 1980 to 2018[J]. Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2699-2709.]

[20] 彭守璋, 赵传燕, 郑祥霖, 等. 祁连山青海云杉林生物量和碳储量空间分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1689-1694. [Peng Shouzhang, Zhao Chuanyan, Zheng Xianglin, et al. Spatial distribution characteristics of biomass and carbon storage in Qinghai spruce forest in Qilian Mountains[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1689-1694.]

[21] Gao X, Huang X, Lo K, et al. Vegetation responses to climate change in the Qilian Mountain Nature Reserve, Northwest China [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01698.

[22] Qian D, Cao G, Du Y, et al. Impacts of climate change and human factors on land cover change in inland mountain protected areas: A case study of the Qilian Mountain National Nature Reserve in China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191: 486.

[23] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于InVEST模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2783-2792. [Wang Bei, Zhao Jun, Hu Xiufang. Spatial pattern analysis of ecosystem services based on InVEST in Heihe River Basin[J]. Journal of Ecology, 2016, 35(10): 2783-2792.]

[24] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 生态系统服务的供给、消费和价值化[J]. 资源科学, 2008, 32(1): 93-99. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Supply, consumption and valuation of ecosystem services in China[J]. Resource Science, 2008, 32(1): 93-99.]

[25] Tang X, Zhao X, Bai Y, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(16): 4021-4026.

[26] 陈光水, 杨玉盛, 谢锦升, 等. 中国森林的地下碳分配[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5148-5157. [Chen Guangshui, Yang Yusheng, Xie Jinsheng, et al. Total belowground carbon allocation in China's forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5148-5157.]

[27] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736. [Li Yifeng, Luo Yuechu, Liu Gang, et al. Effects of land use change on ecosystem services: A case study in Miyun reservoir watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 726-736.]

[28] 李瑾璞, 夏少霞, 于秀波. 等. 基于InVEST模型的河北省陆地生态系统碳储量研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(7): 854-

861. [Li Jinpu, Xia Shaoxia, Yu Xiubo, et al. Evalution of carbon storage on terrestrial ecosystem in Heibei Province based on InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(7): 854-861.]

[29] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459. [Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, Cui Yaoping, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 446-459.]

[30] 邓喆, 丁文广, 蒲晓婷, 等. 基于InVEST模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 324-334, 396. [Deng Zhe, Ding Wenguang, Pu Xiaoting, et al. Spatial-temporal distribution of carbon storage in Qilian Mountain National Park based on InVEST model[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2022, 42(3): 324-334, 396.]

[31] 张鑫, 李俊梅. 昆明西山森林公园碳汇功能及其经济价值估算[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2): 559-562. [Zhang Xin, Li Junmei. Evaluation of carbon-sink function and its economic value of Xishan Forest Park in Kunming[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(S2): 559-562.]

[32] 余娜, 丁波. 贵州不同森林植被碳储量和固碳经济价值研究[J]. 贵州林业科技, 2021, 49(4): 22-27, 41. [Yu Na, Ding Bo. Study on carbon storage and carbon sequestration economic value of different forest vegetation in Guizhou[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2021, 49(4): 22-27, 41.]

Impacts of land use change on carbon storage and estimation of economic value in Qilian Mountain region

LEI Xin, HAI Xinquan

(College of Finance and Economics, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Human activities are the main drivers of land use change, Which indirectly affects the value of ecological services by influencing the structure and function of terrestrial ecosystems. In this article, We analyze the characteristics of land use change based on a land use transfer matrix and dynamic attitude method. We applied the InVEST model to estimate carbon storage, and we estimated the economic value of carbon storage in each period by combining this value with the compound present value formulas from 2000 to 2020 in the Qilian Mountain region. The results showed that, between 2000 and 2020, grassland and unused land were the main land use types in the Qilian Mountains, accounting for more than 80% of the total area of land, and that the conversion these two land use type was the most obvious conversion. The area of forested and unused land decreased between 2000 and 2020, and the area of other land types increased in the Qilian Mountains due to the intensification of human activities and increased urbanization. From 2000 to 2020, carbon storage was significantly correlated with the distribution of land-use types and showed a spatial distribution of "low in the north-west and high in the south-east". In addition, carbon storage increased by 44.26×10^4 t in the Qilian Mountains due to the appropriate geographic environment, the strengthening of vegetation protection, and the efforts of artificial management. the carbon storage in arable land, grassland, and waters increased by 73.1×10^4 t, while the carbon storage of forest land and unused land decreased by 28.8×10^4 t. The economic value of carbon storage in the Qilian Mountains from 2000 to 2020 increased from 2325.9×10^6 yuan to 3908.8×10^6 yuan, with an increment of 1582.9×10^6 yuan and a growth rate of 68.1%. In particular, the economic value of grassland carbon storage increased by 851.8×10^6 yuan over the 20-year period, a growth rate of 71.5%, which was the main driver of the increase in the economic value of carbon storage in the region. Carbon storage is increasing in the Qilian Mountains, and the relevant authorities should continue the previous management schemes while remaining alert to the impact of the climate change on carbon storage in the future. This study provides a scientific basis for setting regional targets for optimizing land use, promoting sustainable development and responding to global climate change.

Keywords: land utilization; InVEST model; carbon storage; economic value of carbon storage; Qilian Mountains